

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/2>

УДК 631.532/.535:581.14



## ВОЗДЕЙСТВИЕ СВЕТОДИОДНЫХ ОБЛУЧАТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА НА РОСТ И РАЗВИТИЕ *Betula pubescens* Ehrh. и *Rubus idaeus* L. В КУЛЬТУРЕ *IN VITRO*

Петр М. Евлаков<sup>1</sup>, [peter.evlakov@yandex.ru](mailto:peter.evlakov@yandex.ru) 0000-0003-0138-2410

Татьяна А. Гродецкая<sup>1</sup>✉, [tatyana.pokusina@yandex.ru](mailto:tatyana.pokusina@yandex.ru) 0000-0002-5448-2792

Ольга А. Федорова<sup>1</sup>, [fed-olga78@mail.ru](mailto:fed-olga78@mail.ru) 0000-0001-7581-6141

Роман А. Шестаков<sup>1</sup>, [sofer82@mail.ru](mailto:sofer82@mail.ru) 0000-0001-7403-7971

Олег Ю. Баранов<sup>2</sup>, [betula-belarus@mail.ru](mailto:betula-belarus@mail.ru) 0000-0002-0665-0093

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Россия

<sup>2</sup>Институт леса НАН Беларуси, ул. Пролетарская, 71, г. Гомель, 246001, Республика Беларусь

Светодиоды (СД) показали высокую эффективность при выращивании растений как *in vivo* в теплицах, так и *in vitro*, в том числе и при клональном микроразмножении. Целью данного исследования было проанализировать влияние спектрального состава светодиодных облучателей с различной долей красного (КС) и синего (СС) света на морфогенез микрорастений ремонтантной формы малины обыкновенной (*Rubus idaeus* L.) сорта Геракл и селекционно-ценного сорта березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.), являющейся объектом единого генетико-селекционного комплекса (ЕГСК), ранее отобранной по признакам засухоустойчивости. В варианте 1 эксперимента соотношение КС/СС было 80/20, в варианте 2 – 70/30, в контроле 50/50. СД варианта 1 в наибольшей степени способствовал улучшению морфометрических и анатомических характеристик у микроклонов малины, увеличивая высоту побегов, число листьев, плотность устьиц, высоту листового эпидермиса и мезофилла. В то же время повышение доли КС приводило к увеличению площади отдельных листьев, общей листовой поверхности и плотности устьиц у микроклонов березы, однако анатомические характеристики листа указывают на уменьшение высоты эпидермальных клеток, размера клеток мезофилла. Таким образом, СД варианта 1 можно рекомендовать для использования при клональном микроразмножении малины в теплицах, для оптимизации процессов роста и получения нормально сформированных растений, в то же время для березы требуется дополнительный подбор оптимальных условий спектрального освещения.

**Ключевые слова:** *Betula pubescens*, *Rubus idaeus*, *in vitro*, светодиоды, спектр света, клональное микроразмножение, мезоструктура листа, морфогенез, мезофилл.

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке ФГБОУ ВО «ВГЛУ им. Г.Ф. Морозова» (внутривузовский грант № 6В/21).

**Благодарности:** Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.


**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



**Для цитирования:** Воздействие светодиодных облучателей различного спектрального состава на рост и развитие *Betula pubescens* Ehrh. и *Rubus idaeus* L. в культуре *in vitro* / П. М. Евлаков, Т. А. Гродецкая, О. А. Федорова, Р. А. Шестаков, О. Ю. Баранов // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12. – № 4 (48). – С. 14–30. – Библиогр.: с. 24–29 (43 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/2>.


Поступила 19.11.2022. Пересмотрена 17.12.2022. Принята 18.12.2022. Опубликована онлайн 26.12.2022.


Article


## EFFECT OF DIFFERENT LED SPECTRUM REGIMENS ON GROWTH AND DEVELOPMENT OF *Betula pubescens* Ehrh. and *Rubus idaeus* L. IN CULTURE *IN VITRO*

Peter M. Evlakov<sup>1</sup>, peter.evlakov@yandex.ru  0000-0003-0138-2410

Tatiana A. Grodetzkaya<sup>1</sup> , tatyana.pokusina@yandex.ru  0000-0002-5448-2792

Olga A. Fedorova<sup>1</sup>, fed-olga78@mail.ru  0000-0001-7581-6141

Roman A. Shestakov<sup>1</sup>, sofer82@mail.ru  0000-0001-7403-7971

Oleg Yu. Baranov<sup>2</sup>, betula-belarus@mail.ru  0000-0002-0665-0093

<sup>1</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

<sup>2</sup>Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Proletarskaya str., 71, Gomel, 246050, Belarus

### Abstract

Light-emitting diodes (LEDs) have shown high efficiency in growing plants both *in vivo* in greenhouses and *in vitro*, including clonal micropropagation. The purpose of this study was to analyze the effect of the spectral composition of LED irradiators with different proportions of red (RL) and blue (BL) light on the morphogenesis of microplants of the remontant form of common raspberry (*Rubus idaeus* L.) cv. Hercules and the selection valuable cultivar of downy birch (*Betula pubescens* Ehrh.), which is the object of a unified genetic breeding complex (UGBC), previously selected on the basis of drought resistance. In the variant 1, the RL/BL ratio was 80/20%, in the variant 2 it was 70/30%, in the control it was 50/50%. The LED in variant 1 contributed to the greatest increase in morphometric and anatomical characteristics in raspberry microplants, increasing the height of shoots, the number of leaves, stomata density, the height of the leaf epidermis and mesophyll. At the same time, an increase in the proportion of RL/BL led to an increase in the leaf area, leaf surface, and stomatal density in birch microclones; however, the anatomical characteristics of the leaf indicate a decrease in the height of epidermal cells and the size of mesophyll cells. Thus, the LED of option 1 can be recommended for use in clonal micropropagation of raspberries in greenhouses, to optimize growth processes and obtain healthy, normally formed plants, while birch requires additional selection of optimal spectral illumination conditions.

**Keywords:** *Betula pubescens*, *Rubus idaeus*, *in vitro*, light emitting diodes, light spectrum, micropropagation, leaf mesostructure, morphogenesis, mesophyll.

**Funding:** The study was carried out with the financial support of FSBEI HE «VSUFT named after G.F. Morozov» (intra-university grant No. 6B/21).

**Acknowledgments:** authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Evlakov P. M., Grodetzkaya T. A., Fedorova O. A., Shestakov R. A., Baranov O. Yu. (2022) Effect of different led spectrum regimens on growth and development of *Betula pubescens* Ehrh. and *Rubus idaeus* L. in culture *in vitro*. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 12, No. 4 (48), pp. 14-30 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/2>.

**Received** 19.11.2022. **Revised** 17.12.2022. **Accepted** 18.12.2022. **Published online** 26.12.2022.

Светодиоды (СД) обладают значительным преимуществом перед другими облучателями за счет повышенной энергоэффективности,

улучшенного оптического распределения, четкого контроля параметров, таких как плотность светового потока и интенсивность излучения,

минимального теплоизлучения [1, 2]. Их эффективность показана в том числе и при использовании в клональном микроразмножении растений [1, 3]. Несмотря на то что использование СД для культивирования растений начато несколько десятилетий назад, их современные аналоги обладают значительными преимуществами, позволяющими проводить тонкую настройку для конкретных объектов. СД облучение способствует стимуляции роста, развития побегов, регенерации корня, увеличению площади листьев и развитию в них хлорофилла, увеличению фотосинтетической активности.

Солнечный свет для растения является не только источником энергии для фотосинтеза, но и регулятором процессов роста и развития [4]. Поэтому, чтобы вырастить растения с нужными характеристиками, крайне важно правильно подобрать параметры освещения [5]. Небольшие размеры, низкая температура излучения, возможность регулировки длины волны, позволяющие тонко контролировать процессы роста и развития, направленно изменять морфологические характеристики растения, управлять накоплением вторичных метаболитов – все это основные преимущества СД перед другими облучателями [3, 5]. Эффективность СД показана, в частности, на различных стадиях клонального микроразмножения древесных растений [1, 3].

Воздействие физиологически значимых синего (СС) и красного (КС) света в спектре вызывает различные эффекты у растений [6]. Так, освещение светодиодами с большей долей синего света (34 % СС и 23 % КС от общего соотношения) в спектре способствовало стимуляции дыхания и циклического транспорта электронов у растений латука [7], увеличению соотношения  $C/N$  у растений киви [8], устьичной проводимости у яблоневого подвоя [9], накоплению хлорофилла [8]. Воздействие СС способствовало накоплению антоцианов у красной груши [10], играло важную роль на ранних стадиях морфогенеза, способствуя деэтиоляции у *A. thaliana* [11]. Наличие СС в спектре способствовало регуляции фенологических проявлений, фотопериода и температуры у растений березы, ольхи и дуба [12]. СС является

важным регулятором движения устьиц у многих растений [13], особенно в условиях снижения фотосинтеза [14]. В то же время освещение КС приводило к активации линейного транспорта электронов [7], увеличению скорости фотосинтеза [7], накоплению биомассы [7, 9] и увеличению продуктивности [7], стимуляции роста и развития, образованию устьиц, накоплению сахаров и крахмала [8] у растений. Опосредованная салициловой кислотой аккумуляция флавоноидов у гинкго происходила под влиянием красного и дальнего красного, но не синего света [15].

Показано, что испускаемые светодиодными облучателями КС и СС являются необходимыми для стимуляции ростовых процессов как побега, так и корня, синтеза пигментов и антиоксидантов, увеличения количества листьев и их площади, роста массы растения [3, 5]. Причем большим эффектом обладает именно комбинация СС и КС света, а чрезмерное увеличение СС угнетает ростовые процессы и снижает выход фотосинтеза. Одновременное воздействие КС и СС оказывает синергический эффект на рост и развитие растений в большей степени, чем при моноспектральном облучении. Так, освещение только КС ведет к серьезным нарушениям фотосинтеза, накопления вторичных метаболитов [2]. При этом важно учитывать, что разные виды и сорта растений обладают индивидуальной чувствительностью к соотношению КС и СС в спектре. В связи с этим, для оптимального развития необходимо подобрать спектральный состав, индивидуальный для каждого вида растений.

Приоритетной задачей в настоящее время является получение качественного, стандартного посадочного материала с целью создания лесных и сельскохозяйственных культур [16]. Клональное микроразмножение – перспективный биотехнологический метод, позволяющий ускоренно тиражировать выдающиеся и уникальные, а также трудно размножаемые традиционными методами растения [17, 18]. *In vitro* клонирование позволяет массово тиражировать хозяйственно-ценные объекты, включая генотипы древесных (березы) [19, 20] и сельскохозяйственных (малины) [21, 22] растений и

сохранить их исходные свойства. Однако процесс культивирования *in vitro* требует подбора оптимальных условий, которые зависят от видовой принадлежности растений. При этом режим освещения является одним из основных параметров, от которого зависят их рост, развитие и продуктивность.

Целью данной работы было установление особенности влияния СД освещения различного спектрального состава с варьируемыми соотношениями физиологически значимых спектральных диапазонов на рост и морфоанатомические характеристики малины и березы *in vitro*.

### Материалы и методы

В качестве объектов исследования были использованы микроклоны березы пушистой 15-1 (*Betula pubescens* Ehrh.), являющейся объектом единого генетико-селекционного комплекса (ЕГСК) Воронежской области, ранее отобранные по признакам засухоустойчивости. Вторым объектом служила ремонтантная форма малины обыкновенной сорта Геракл (*Rubus idaeus* L.). Растения-регенеранты березы и малины получали из апикальной и пазушной меристем. Побеги промывали под проточной водой в течение 1 часа, нарезали на сегменты 10-15 мм. Основная стерилизация проводилась в ламинар-боксе в растворе, включающем 15 мл 5 %-го раствора гипохлорита натрия и 85 мл стерильной дистиллированной воды в течение 15 мин. Промывка проводилась также стерильной водой. Стерильные побеги впоследствии высаживали индивидуально в пробирки с питательной средой (МС) в вертикальном положении примерно на половину высоты и на протяжении 21 суток культивировали на агаризованной питательной среде Мурасиге-Скуга (МС) стандартного состава [23] в климатической камере KBV 400 (E5.1) («Binder», Германия), оснащенной для эксперимента светодиодными лампами, со следующими условиями климатического режима: 16-часовой фотопериод при освещенности  $30 \text{ мкМ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , температуре  $24 \pm 2^\circ\text{C}$ . На этапе мультипликации использовали среду МС с добавлением регуляторов роста – 300 мкг/л бензиламинопурина (БАП) и 200 мкг/л гибберелловой кислоты (ГА3) ( $\geq 99\%$ , «Sigma-Aldrich», США). Все манипуляции с

растениями *in vitro* осуществляли в асептических условиях в ламинарных боксах Lamsystems (класс II, тип А) (Россия).

В эксперименте были использованы регулируемые СД, изготовленные на научно-производственном предприятии «Воронежский центр светотехники». СД были настроены на физиологически значимые для растений красный и синий спектральные диапазоны [6]. В качестве контроля использовали светодиодные светильники PFL-C-30w (Jazz Way, КНР), имеющие в составе спектра фотосинтетически-активный диапазон. Параметры СД представлены в табл. 1.

Опытные растения на этапе мультипликации переносили под светодиодные источники, расположенные строго над экспериментальными объектами на расстоянии  $30 \pm 2$  см от верхушечного листа. Температура в помещении поддерживалась на уровне  $24 \pm 2^\circ\text{C}$ . Контроль энергоэффективности потока оптического излучения проводили с помощью спектрофотометра марки «ТКА – Спектр» (ФАР), который позволяет измерять абсолютное спектральное распределение ( $\lambda$ ) источников освещения, а также плотность потока фотонов фотосинтеза ЕФАР в  $\text{мкМ} \cdot \text{м}^{-2}$ . По истечении 21 суток оценивали морфоанатомические характеристики микрорастений: длину побегов, число листьев, площадь листа и суммарной листовой поверхности, плотность и размеры устьиц, показатели мезоструктуры листа.

Для оценки площади листьев каждого генотипа использовали портативный лазерный измеритель CI-202 (CID «Bio-Science», США). Анатомические наблюдения проводили на хорошо сформированных листьях верхушечного побега. Срезы просматривали на микропрепаратах, зафиксированных в глицерине, под световым микроскопом Variant Jenamed («Carl Zeiss», Jena, Германия). Подсчет количества устьиц с нижней стороны листа проводили на этих же листьях по методу Н.А. Анели [24]. Повторность измерения для каждого варианта была не менее 30-кратной.

Статистическую обработку проводили с использованием программы Statistica версии 12.6 («StatSoft, Inc.», США). Значимость различий величин контрольных и опытных показателей определяли по t-критерию Стьюдента (при  $p < 0,05$ ).

Таблица 1

Спектральные характеристики светодиодных светильников, использовавшихся для облучения микрорастений березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) и малины обыкновенной (*Rubus idaeus* L.) сорта Геракл

Table 1

Spectral characteristics of LEDs used for irradiation of microplants of downy birch (*Betula pubescens* Ehrh.) and common raspberry (*Rubus idaeus* L.) cv. Hercules

	Маркировка СД   LED label		
	VCSI-HC01.00-40-TR-RB-U		PFL-C-30w
	Вариант 1   Variant 1	Вариант 2   Variant 2	Контроль   Control
Максимальная потребляемая мощность (Вт)   Maximum Power Consumption (W)	36	36	30
Плотность потока фотонов (мкМ·м <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup> )   Photon-Flux Density (μMm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	50	50	50
Соотношение красно-го/синего спектра (%)   Red/Blue Ratio (%)	80/20	70/30	50/50

Источник: собственные вычисления автор(ов)

Source: own calculations

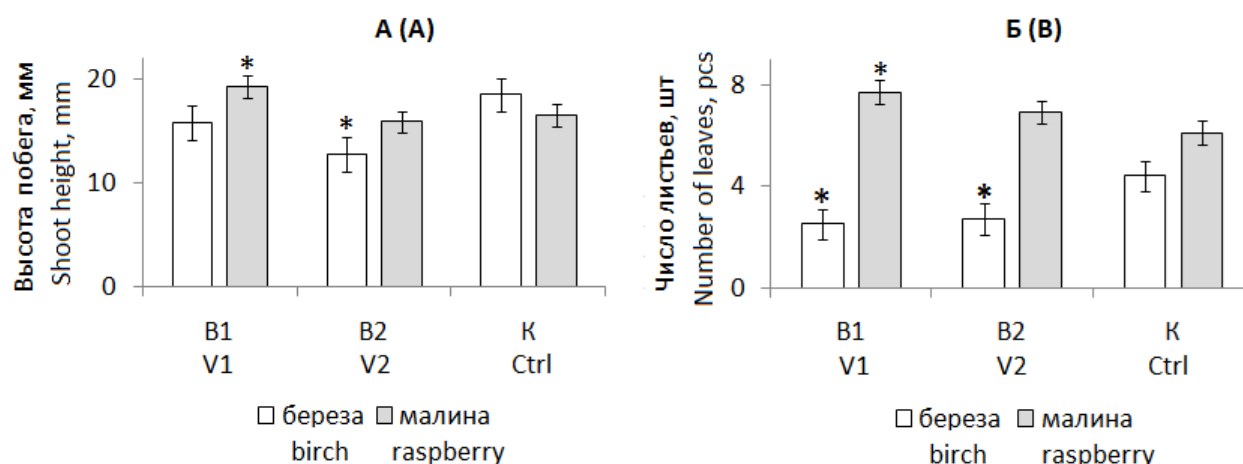


Рис. 1. Морфометрические параметры микрорастений березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) и малины обыкновенной (*Rubus idaeus* L.) сорта Геракл при культивировании с использованием СД различного спектрального состава: А – изменение высоты побега; Б – изменение числа листьев. В1 – вариант облучения 1 (80% КС, 20% СС), В2 – вариант облучения 2 (70% КС, 30% СС), К – контроль (50% КС, 50% СС), (n = 30, M±SEM; г. Воронеж, 2020 год).

Примечание: \*Отмеченный вариант достоверно отличается от контроля при p < 0,05.

Figure 1. Morphometric parameters of microplants of downy birch (*Betula pubescens* Ehrh.) and common raspberry (*Rubus idaeus* L.) cv. Hercules during cultivation using LEDs of different spectral composition. A – change in the height of the shoot, B – change in the number of leaves. V1 – exposure option 1 (80% RL, 20% BL), V2 – irradiation 2 (70% RL, 30% BL), Ctrl – control (50% RL, 50% BL), (n = 30, M± SEM; Voronezh, 2020).

Note: \*The marked variant significantly differs from the control at p < 0.05.

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Результаты и обсуждение

Влияние СД с содержанием КС в спектре 80 % (вариант 1) и 70 % (вариант 2) на морфометрические показатели высоты побегов и числа листьев микрорастений березы и малины было исследовано после трехнедельного культивирования *in vitro* (рис. 1).

Максимальная высота побегов у микрорастений малины (рис. 1, А) ( $19,3 \pm 0,94$  мм) была зафиксирована в группе, освещённой светом с соотношением КС/СС 80 % и 20 %, а при снижении доли КС до 70 % статистически значимых отличий от контрольных значений выявлено не было. Известно, что КС, за счёт активации фитохромной системы, ускоряет рост стебля и боковых побегов [4]. В то же время увеличение доли СС в спектре облучателя может замедлить рост клеток и снизить длину побегов, так как СС активирует криптохром-зависимое ингибирование ростовых процессов [4, 5, 25]. Показано также, что лучший эффект достигается при совмещении КС и СС в спектре, вероятно, за счёт взаимодействия фитохромной и криптохромной систем [5, 26]. Так, смешанный спектр КС/СС в большей степени, чем чистый КС, приводил к росту побегов у микрорастений малины, осины и арабидопсиса [6, 27, 28]. Оптимальное соотношение КС/СС индивидуально для каждого вида и сорта растения [5]. Так, например, широкий спектр реакций на соотношение КС/СС показывают микрорастения малины, земляники, картофеля [27-30]. Соотношение СС, КС, дальнего красного и белого света (1:1:1:1) стимулировало рост, накопление биомассы и интенсивность фотосинтеза у *in vitro* клонов *Rubus idaeus* L. [27]. Исследование содержания фотосинтетических пигментов в условиях LED-освещения показало, что у растений-регенерантов осины и березы наблюдается снижение содержания фотосинтетических пигментов в условиях более низкого содержания СС и более высокого – КС [6]. Установлено, что черенки березы карельской, полученные из апикальной и медиальной части микрорастений, проявляли разную чувствительность к спектральному составу СД освещения [31]. В настоящем исследовании увеличение доли КС в спектре излучения СД до 80 % способствовало ускорению роста побегов опытных микрорастений малины сорта Геракл.

Сравнительный анализ контрольных и опытных растений березы показал, что увеличение доли КС в спектре СД не способствовало удлинению побега (рис. 1, А). Показано, что для листовых растений оптимальное соотношение КС/СС соответствует 27 % и 37 % соответственно [32]. То есть для березы благоприятным является увеличение доли СС в спектре, что было представлено в контрольном варианте опыта и согласуется с данными, полученными Ю.Л. Цельникер при анализе распределения энергии в составе радиации под пологом хвойных и листовых древостоев.

Полученные нами данные можно объяснить высокой интенсивностью освещения ( $50 \text{ мкМ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ), что, по-видимому, является избыточным для оптимального роста микрорастений березы (табл. 1). Так, по данным Т.Н. Куделиной, интенсивность  $15 \text{ мкМ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$  была достаточной для стимуляции ростовых процессов микроклонов осины, но слишком низкой для ускорения роста побегов березы *in vitro* [6]. Вероятно, дальнейший поиск оптимальных параметров освещения для *in vitro* культивирования растений березы необходимо сосредоточить в диапазоне от 15 до  $50 \text{ мкМ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Показатели числа листьев у исследуемых растений представлены на рис. 1, Б. Число листьев у микроклонов березы, культивируемых при изученных вариантах освещения, было достоверно меньше, чем в контрольном варианте. У микроклонов малины при освещении СД с соотношением КС/СС 80/20 (вариант 1) этот показатель значительно увеличился, в то время как у микроклонов варианта 2, с более высокой долей СС, остался на уровне контроля.

С одной стороны, в ряде исследований показано, что освещение СС в большей степени, чем КС, приводит к увеличению числа листьев у растений малины, момордики, мирта, выращиваемых *in vitro* [27, 33, 34]. В то же время установлено, что КС, усиливая кушение и рост стебля в длину, повышает коэффициент мультипликации и, как следствие, число листьев [4, 34]. С другой стороны, СС может приводить к снижению числа листьев, их длины, площади, массы [35]. Эти данные можно объяснить тем, что на один и тот же признак могут влиять разные факторы, а реакция растения на них зависит от

вида, сорта, стадии развития [5, 27, 36]. Установленное в настоящем исследовании уменьшение числа листьев у микрорастений березы, возможно, связано со снижением доли СС и избыточной долей КС, что на данном этапе развития замедлило их рост. Для малины, наоборот, данные спектральные характеристики – 80 % КС и 20 % СС – оказались благоприятными для стимуляции роста микроклонов.

Далее было исследовано влияние СД на морфометрические показатели площади листа и листовой поверхности микрорастений березы и малины *in vitro* (рис. 2).

Освещение микроклонов малины СД вариантов 1 и 2 способствовало достоверному увеличению толщины листа за счёт высоты фотосинтетических тканей – палисадной паренхимы и губчатого мезофилла. В варианте опыта 2 увеличилась высота верхнего эпидермиса и палисадной паренхимы. Существенные отличия между вариантами опыта выявлены для губчатого мезофилла, его высота увеличилась относительно СД варианта 2 на 25 %. Эти данные согласуются с исследованием влияния спектрального состава СД

на развитие микрорастений лещины [37]. При увеличении доли КС увеличивалась высота верхнего эпидермиса и палисадной паренхимы, и, как следствие, толщина листа.

В ряде исследований показано, что красный и синий свет оказывают синергический эффект, увеличивая уровень фотосинтеза в большей мере, чем при облучении только светом одной длины волны [5]. Так, смешанный красный и синий свет в большей степени увеличивали толщину листа у перца и картофеля [30, 41]. Из литературных данных известно, что сорта малины обладают полиморфизмом реакций на один и тот же спектр излучения СД [27, 36]. По-видимому, именно спектр исследуемого облучателя с преобладанием КС с долей 80 % оказался наиболее благоприятным для индукции развития фотосинтетических тканей листа малины сорта Геракл (рис. 3).

Увеличение доли КС с одновременным снижением доли СС (варианты 1 и 2) способствовало уменьшению толщины листа у микрорастений березы относительно контроля (табл. 2, рис. 4).

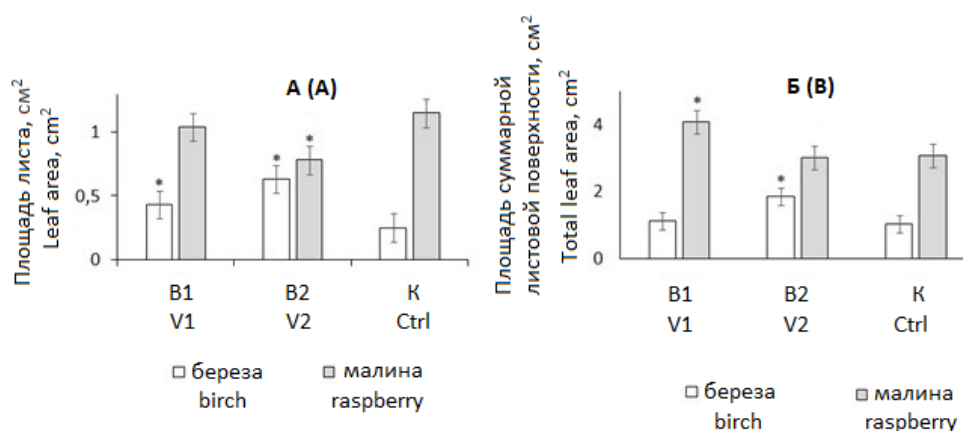


Рис. 2. Площадь листа и площадь суммарной листовой поверхности у микрорастений березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) и малины обыкновенной (*Rubus idaeus* L.) сорта Геракл при культивировании с использованием СД различного спектрального состава: А – изменение площади листа; Б – изменение площади листовой поверхности, В1 – вариант облучения 1 (80% КС, 20% СС), В2 – вариант облучения 2 (70% КС, 30% СС), К – контроль (50% КС, 50% СС), (n = 30, M±SEM; г. Воронеж, Воронежская обл., 2020 год). Примечание. \*Отмеченный вариант достоверно отличается от контроля при p < 0,05

Figure 2. Leaf area and total leaf surface area in microplants of downy birch (*Betula pubescens* Ehrh.) and common raspberry (*Rubus idaeus* L.) cv. Hercules during cultivation using LEDs of different spectral composition. A – change in leaf area, B - change in leaf surface area, V1 - irradiation option 1 (80% RL, 20% BL), C2 - irradiation variant 2 (70% RL, 30% BL), Ctrl - control (50% RL, 50% BL), (n = 30, M±SEM; Voronezh, Voronezh region, 2020). Note. \*The marked variant is significantly different from the control at p < 0.05

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Морфометрические параметры устьиц и мезоструктуры листа микрорастений березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) и малины обыкновенной (*Rubus idaeus* L.) сорта Геракл при культивировании с использованием СД различного спектрального состава (n = 30, M±SEM; г. Воронеж, Воронежская обл., 2020 г.)

Table 2

Morphometric parameters of stomata and leaf mesostructure of microplants of downy birch (*Betula pubescens* Ehrh.) and common raspberry (*Rubus idaeus* L.) cv. Hercules during cultivation using LEDs of different spectral composition (n = 30, M±SEM; Voronezh, Voronezh region, 2020 year)

Показатель   Parameter	Маркировка СД   LED label		
	VCSI-HC01.00-40-TR-RB-U		PFL-C-30w
	Вариант 1   Variant 1	Вариант 2   Variant 2	Контроль   Control
<i>Малина   Raspberry</i>			
Верхний эпидермис, мкм   Upper epidermis, μm	16,3 ± 0,59*	15,4 ± 0,28*	14,3 ± 0,38
Палисадная паренхима, мкм   Palisade parenchyma, μm	32,8 ± 0,76*	34,3 ± 1,53*	28,8 ± 0,99
Губчатая паренхима, мкм   Spongy parenchyma, μm	21,8 ± 1,38*	16,4 ± 1,33	18,1 ± 0,68
Нижний эпидермис, мкм   Lower epidermis, μm	14,2 ± 0,60	13,4 ± 0,48	13,1 ± 0,36
Толщина листа, мкм   Leaf thickness, microns	85,0 ± 2,30*	79,5 ± 3,01	74,3 ± 1,15
Плотность устьиц, шт./мм <sup>2</sup>   Stomata density, pcs/mm <sup>2</sup>	348,8 ± 8,39*	252,2 ± 11,52	247,8 ± 14,44
Длина устьиц, мкм   Stomata length, μm	20,6 ± 1,39*	22,6 ± 0,70*	25,5 ± 0,64
Ширина устьиц, мкм   Stomata width, μm	16,0 ± 0,93*	17,9 ± 1,03*	20,6 ± 0,56
<i>Береза   Birch</i>			
Верхний эпидермис, мкм   Upper epidermis, μm	16,5 ± 0,88	14,6 ± 0,62*	16,2 ± 0,48
Палисадная паренхима, мкм   Palisade parenchyma, μm	19,2 ± 1,03*	19,5 ± 0,53*	24,5 ± 1,06
Губчатая паренхима, мкм   Spongy parenchyma, μm	30,1 ± 1,14	32,7 ± 1,10	32,3 ± 1,90
Нижний эпидермис, мкм   Lower epidermis, μm	13,4 ± 0,63	10,6 ± 0,38*	13,0 ± 0,37
Толщина листа, мкм   Leaf thickness, microns	79,2 ± 2,87	77,5 ± 1,24*	85,9 ± 2,90
Плотность устьиц, шт./мм <sup>2</sup>   Stomata density, pcs/mm <sup>2</sup>	83,9 ± 5,13*	124,9 ± 7,56*	63,9 ± 3,55
Длина устьиц, мкм   Stomata length, μm	37,2 ± 0,90	41,2 ± 1,79	40,3 ± 1,81
Ширина устьиц, мкм   Stomata width, μm	29,7 ± 1,35	32,9 ± 1,83	30,5 ± 1,58

Примечание: Вариант 1 (80 % КС, 20 % СС), Вариант 2 (70 % КС, 30 % СС), Контроль (50 % КС, 50 % СС).

\*Отмеченный вариант достоверно отличается от контроля при p < 0,05.

Note. Variant 1 (80 % RL, 20 % BL), Variant 2 (70 % RL, 30 % BL), Control (50 % RL, 50 % BL). \*The marked variant significantly differs from the control at p < 0.05.

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations



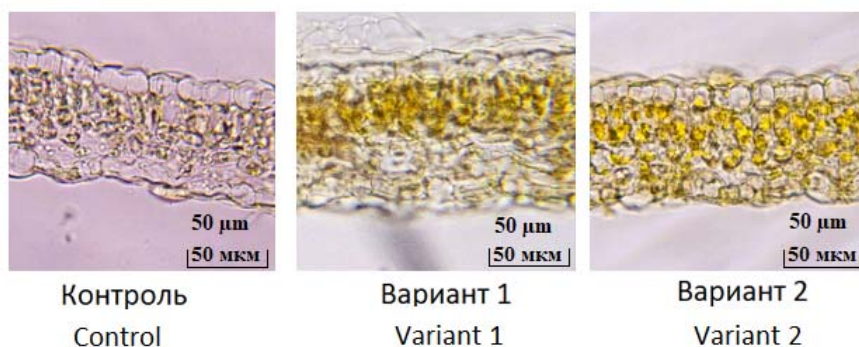


Рис. 3. Поперечный срез листа малины обыкновенной (*Rubus idaeus* L.) сорта Геракл в различных условиях светового режима: Вариант 1 (80 % КС, 20 % СС), Вариант 2 (70 % КС, 30 % СС), Контроль (50 % КС, 50 % СС). Масштаб: 50 мкм (световой микроскоп Variant Jenamed, «Carl Zeiss», Германия)

Figure 3. Cross section of a leaf of common raspberry (*Rubus idaeus* L.) cv. Heracles under different light conditions: Variant 1 (80 % RL, 20 % BL), Variant 2 (70 % RL, 30 % BL), Control (50 % RL, 50 % BL). Scale: 50 μm (light microscope Variant Jenamed, Carl Zeiss, Germany)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

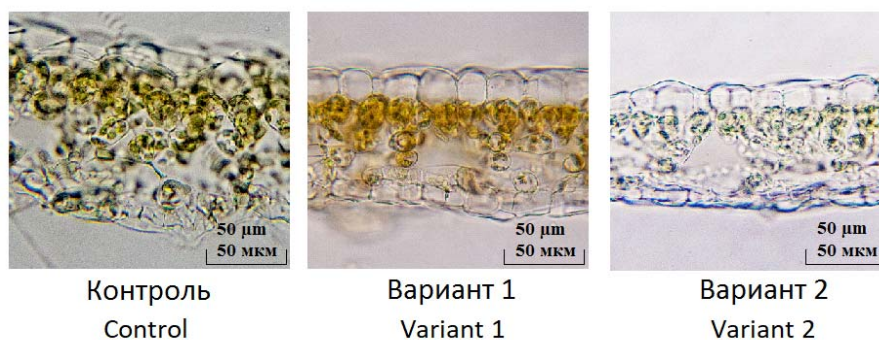


Рис. 4. Поперечный срез листа березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) в различных условиях светового режима: Вариант 1 (80 % КС, 20 % СС), Вариант 2 (70 % КС, 30 % СС), Контроль (50 % КС, 50 % СС). Масштаб: 50 мкм (световой микроскоп «Carl Zeiss», Германия)

Figure 4. Cross section of a leaf of downy birch (*Betula pubescens* Ehrh.) under different light conditions: Variant 1 (80 % RL, 20 % BL), Variant 2 (70 % RL, 30 % BL), Control (50 % RL, 50 % BL). Scale: 50 μm (light microscope "Carl Zeiss", Germany)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Площадь листа микроклонов березы достоверно выросла относительно контроля в обоих вариантах опыта, что, по-видимому, было вызвано увеличением доли КС в спектре светодиодов (рис. 2, А). Показано, что КС активирует фитохром В, который запускает процессы, приводящие к увеличению размеров листьев [4]. Так, освещение красным светом приводило к росту площади листьев у микроклонов ореха и груши [37, 38]. При увеличении доли КС в спектре росла площадь листа у микроклонов осины

и земляники [6, 39]. Эти данные подтверждают полученные нами результаты. Увеличение суммарной площади листовой поверхности в опытном варианте 2 (рис. 2, Б) у микроклонов березы связано с ростом средней площади отдельного листа.

Площадь листа у опытных микроклонов малины снижалась при увеличении доли КС и одновременном снижении доли СС в спектре СД. Ранее было показано, что СС может влиять на изменение параметров листовой поверхности.

Увеличение доли СС способствовало росту площади листа у картофеля, росту его длины и ширины у эустомы [30, 40]. Таким образом, уменьшение данного показателя у микрорастений малины может быть связано со снижением доли СС в спектре.

Исследование влияния СД на число устьиц и мезоструктуру листа у растений малины и березы было произведено после трехнедельного отращивания *in vitro* (табл. 2).

Освещение микроклонов малины СД вариантов 1 и 2 способствовало достоверному увеличению толщины листа за счёт высоты фотосинтетических тканей – палисадной паренхимы и губчатого мезофилла. В варианте опыта 2 увеличилась высота верхнего эпидермиса и палисадной паренхимы. Существенные отличия между вариантами опыта выявлены для губчатого мезофилла, его высота увеличилась относительно СД варианта 2 на 25 %. Эти данные согласуются с исследованием влияния спектрального состава СД на развитие микрорастений лещины [37]. При увеличении доли КС увеличивалась высота верхнего эпидермиса и палисадной паренхимы, и, как следствие, толщина листа.

Ранее проведенные исследования показали, что СС способствовал росту листа в толщину. При этом происходила активация криптохромной системы, повышение уровня фотосинтеза, рост клеток паренхимы. Проводимость устьиц также возрастала, активировались гены ферментов, связанных с фотосинтезом, в том числе Рубиско [5, 30].

У опытных растений березы в вариантах 1 и 2 наблюдалось достоверное снижение высоты палисадной паренхимы – 19,2 и 19,5 нм соответственно, в то время как у контроля этот показатель составлял 24,5 нм. При этом высота губчатой паренхимы была в пределах контрольного варианта. Полученные результаты могут быть связаны с уменьшением доли СС в спектре опытных вариантов облучателей. По данным Рони с соавт., СС увеличивал высоту верхнего и нижнего эпидермиса и палисадной паренхимы у микрорастений эустомы [40].

При использовании СД с увеличенной долей КС в спектре плотность устьиц (количество устьиц в единице листа) у микрорастений малины и березы достоверно выросла (табл. 2). При этом в обоих вариантах опыта длина и ширина устьиц у микрорастений малины снижалась относительно контроля. Их размеры у березы *in vitro* в обеих опытных группах существенно не изменились, что может создавать определенные преимущества при усвоении углекислоты в процессе фотосинтеза.

В работе О.В. Войцеховской показано, что КС индуцирует развитие устьиц из эпидермальных клеток, активируя фитохром В [4]. Однако непосредственно на увеличение плотности устьиц и их размер оказывает влияние СС, который через криптохромную систему вызывает увеличение замыкающих клеток, расширяя устьичную щель и способствуя притоку углекислоты в межклетники [40, 42]. Так, при сочетании СС и дальнего красного света у микрорастений хризантемы число устьиц было максимальным, но они были самыми мелкими, а при сочетании КС и СС устьица были крупнее, но их число на единицу площади было минимальным [43]. СС увеличивал плотность устьиц, а также их длину и ширину у микроклонов эустомы [40].

Наблюдаемое увеличение количества устьиц при одновременном увеличении площади листа у микрорастений березы приводит к оптимизации газообмена и поступления  $\text{CO}_2$  в клетки мезофилла, что положительно сказывается на процессах роста и развития целого растения.

### Заключение

Полученные результаты свидетельствуют, что спектральный состав СД облучателей с физиологически значимым спектральным диапазоном оказывает специфичное влияние на рост и морфоанатомические характеристики изученных видов растений в культуре *in vitro*, что обуславливает необходимость подбора спектрального состава с учетом видовых особенностей древесных и сельскохозяйственных культур.

Более высокие показатели по высоте побегов, числу листьев, толщине мезофилла у контрольных растений, освещенных СД с долей СС

50 %, свидетельствуют о его значительной роли для нормального развития микроклонов березы 15-1.

Спектральный состав СД облучателей с соотношением 80 % красного и 20 % синего света в спектре способствует увеличению толщины тканей мезофилла, числа листьев и высоты побегов у

микрорастений малины, что позволяет создать эффективный протокол с высоким процентом выхода стандартного посадочного материала для коммерческого использования малины сорта Геракл.

### Список литературы

1. Dutta Gupta S. Light emitting diodes for agriculture. Singapore Springer Nature Singapore Pte Ltd, Singapore. 2017: 334. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-10-5807-3>.
2. Landi M., Zivcak M., Sytar O., Brestic M., Allakhverdiev S. I. Plasticity of photosynthetic processes and the accumulation of secondary metabolites in plants in response to monochromatic light environments: A review. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*. 2020; 1861: 148131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2019.148131>.
3. Batista D. S., Felipe S. H. S., Silva T. D. (et al.). Light quality in plant tissue culture: does it matter? *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*. 2018; 54(3): 195-215. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11627-018-9902-5>.
4. Voitsekhovskaja O. V. Phytochromes and other (photo) receptors of information in plants. *Russ. J. Plant Physiol.* 2019; 66(3): 351-364. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1021443719030154>.
5. Zakurin A. O., Shchennikova A. V., Kamionskaya A. M. Artificial-Light Culture in Protected Ground Plant Growing: Photosynthesis, Photomorphogenesis, and Prospects of LED Application. *Russ. J. Plant Physiol.* 2020; 67: 413-424. DOI: <https://doi.org/10.1134/s102144372003022x>.
6. Куделина Т. Н., Константинов А. В., Обуховская Л. В., Молчан О. В. Особенности формирования фотосинтетического аппарата микроклонов *Populus tremula L.* и *Betula pendula Roth.* при LED-освещении различного спектрального состава в процессе адаптации *ex vitro*. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия биологических наук*. 2019; 64(4): 456-466. DOI: <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2019-64-4-456-466>.
7. Yudina L., Sukhova E., Mudrilov M. (et al.). Ratio of Intensities of Blue and Red Light at Cultivation Influences Photosynthetic Light Reactions, Respiration, Growth, and Reflectance Indices in Lettuce. *Biology*. 2022; 11(1): 60. DOI: <https://doi.org/10.3390/biology11010060>.
8. Xiaoying L., Mingjuan Y., Xiaodong X. (et al.) Effect of light on growth and chlorophyll development in kiwifruit *ex vitro* and *in vitro*. *Scientia Horticulturae*. 2022; 291: 110599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110599>.
9. Chung G. J., Lee J. H., Oh M. M. Growth and Acclimation of *In Vitro*-Propagated M9 Apple Rootstock Plantlets under Various Visible Light Spectrums. *Agronomy*. 2020; 10(7): 1017. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10071017>.
10. Tao R., Bai S., Ni J., Yang Q., Zhao Y., Teng Y. The blue light signal transduction pathway is involved in anthocyanin accumulation in 'Red Zaosu' pear. *Planta*. 2018; 248(1): 37-48. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00425-018-2877-y>.
11. Dănăilă-Guidea S. M., Delian E. An overview on blue light benefits on plants physiological performances and on plant products qualities. *Scientific Papers. Series B, Horticulture*. 2020; LXIV(1): 643-652. URL: [http://horticulturejournal.usamv.ro/pdf/2020/issue\\_1/Art94.pdf](http://horticulturejournal.usamv.ro/pdf/2020/issue_1/Art94.pdf).
12. Brelford C. C., Robson T. M. Blue light advances bud burst in branches of three deciduous tree species under short-day conditions. *Trees*. 2018; 32(4): 1157. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1684-1>.
13. Matthews J. S., Violet-Chabrand S., Lawson T. Role of blue and red light in stomatal dynamic behaviour. *Journal of Experimental Botany*. 2020; 71(7): 2253-2269. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erz563>.

14. Rahmati Ishka M. A surprising feature of the blue light: Regulation of leaf hydraulic conductance via an autonomous phototropin-mediated blue light signaling pathway in bundle-sheath cells. *The Plant Cell*. 2022; 231: 2231-2246. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.17538>.
15. Ni J., Dong L., Jiang Z. (et al.). Salicylic acid-induced flavonoid accumulation in *Ginkgo biloba* leaves is dependent on red and far-red light. *Industrial Crops and Products*. 2018; 118: 102-110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.03.044>.
16. Новиков А. И. Совершенствование технологии получения высококачественного лесосеменного материала : дис. ... д-ра техн. наук : 05.21.01 / Новиков Артур Игоревич ; Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова. – Воронеж, 2021. – 341 с.
17. Fernandes P., Tedesco S., Vieira da Silva I., Santos C., Machado H., Lourenço Costa R. A new clonal propagation protocol develops quality root systems in chestnut. *Forests*. 2020; 11(8): 826. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11080826>.
18. Henao-Ramírez A. M., Urrea-Trujillo A. I. Somatic Embryogenesis for Clonal Propagation and Associated Molecular Studies in Cacao (*Theobroma cacao* L.). In *Agricultural, Forestry and Bioindustry Biotechnology and Biodiscovery* / Chong, P., Newman, D., Steinmacher, D. (eds). Springer, Cham. 2020: 63-102. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-51358-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51358-0_5).
19. Zeps M., Kondratovičs T., Grigžde E., Jansons Ā., Zeltiņš P., Samsone I., Matisons R. Plantlet Anatomy of Silver Birch (*Betula pendula* Roth.) and Hybrid Aspen (*Populus tremuloides* Michx.× *Populus tremula* L.) Shows Intraspecific Reactions to Illumination *In Vitro*. *Plants*. 2022;11(8):1097 DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11081097>.
20. Gailis A., Samsone I., Šēnhofa S., Girgžde E., Kāpostiņš R., Jansons Ā. Silver birch (*Betula pendula* Roth.) culture initiation *in vitro* and genotype determined differences in micropropagation. *New Forests*. 2021; 52(5): 791-806. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09828-9>.
21. Kabyzbekova B., Turdiev T., Chukanova N., Kovalchuk I. Optimization of *in vitro* cloning of different genotypes of fruit and berry crops. *Journal of Biotechnology*. 2019; 305: S59. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2019.05.208.
22. Khlebova L. P., Titova A. M., Pirogova A. V. Biotechnological approaches to the reproduction of remontant forms of red raspberry. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2019; 9(3): 402-405. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/biotechnological-approaches-to-the-reproduction-of-remontant-forms-of-red-raspberry>.
23. Oseni O. M., Pande V., Nailwal T. K. A review on plant tissue culture, a technique for propagation and conservation of endangered plant species. *International journal of current microbiology and applied sciences*. 2018; 7(7): 3778-3786. DOI: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.707.438>.
24. Анели Н. А. Атлас эпидермы листа. Тбилиси : Мецниерба, 1975. 105 с.
25. Lin C., Ahmad M., Cashmore A. R. Arabidopsis cryptochromel is a soluble protein mediating blue light-dependent regulation of plant growth and development. *The Plant Journal*. 1996; 10(5): 893-902. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-313x.1996.10050893.x>.
26. Su J., Liu B., Liao J., Yang, Z., Lin C., Oka Y. Coordination of cryptochrome and phytochrome signals in the regulation of plant light responses. *Agron. J*. 2017; 7(1): 1-22. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy7010025>.
27. Nacheva L., Dimitrova N., Koleva-Valkova L., Tarakanov I., Vassilev A. Effect of LED lighting on the growth of raspberry (*Rubus idaeus* L.) plants *in vitro*. *Agric. Sci*. 2021; 13(29): 126-140. DOI: <https://doi.org/10.22620/agrisci.2021.29.015>.
28. Kudelina T. N., Krivobok A. S., Bibikova T. N., Molchan O. V. Features of Arabidopsis thaliana photomorphogenesis when using LED-lighting with different spectral composition. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Biological Series*. 2021; 66(1): 42-52. DOI: <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2021-66-1-42-52>.
29. Яковцева М. Н., Говорова Г. Ф., Тараканов И. Г. Фотоморфогенетическая регуляция роста, развития и продукционного процесса растений земляники садовой (*Fragaria×ananassa* L.) в условиях светокультуры. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2015; 3: 25-35. URL: <https://cyberleninka.ru/>

article/n/fotomorfogeneticheskaya-regulyatsiya-rosta-razvitiya-i-produktsionnogo-protssesa-rasteniy-zemlyaniki-sadovoy-fraga-ria-h-ananassa-l-v.

30. Li Y., Xin G., Liu C., Shi Q., Yang F., Wei M. Effects of red and blue light on leaf anatomy, CO<sub>2</sub> assimilation and the photosynthetic electron transport capacity of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings. BMC Plant Biol. 2020; 20(1): 1-16. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.2.24179/v3>.

31. Обуховская Л. В., Куделина Т. Н., Константинов А. В. Адаптация *ex vitro* микроклонально размноженных растений карельской березы (*Betula pendula* var. *Carelica* Mercl.) в условиях полноспектрального LED-освещения при варьировании физиологически важных спектральных диапазонов. Клеточная биология и биотехнология растений: тез. докл. III Междунар. науч.-практ. конф., Респ. Беларусь, Минск, 24–27 мая 2022 г. Белорус. гос. ун-т, Ин-т леса НАН Беларуси ; редкол.: В. В. Демидчик (гл. ред.) [и др.]. Минск : БГУ, 2022. 72 с. URL: <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/281098/1/72.pdf>.

32. Цельникер Ю. Л. Физиологические основы теневыносливости древесных растений. М., 1978. 212 с.

33. Cióć M., Szewczyk A., Żupnik M., Kalisz A., Pawłowska B. LED lighting affects plant growth, morphogenesis and phytochemical contents of *Myrtus communis* L. *in vitro*. Plant Cell, Tissue Organ Cult. 2018; 132 (3): 433-447. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11240-017-1340-2>.

34. Lim C. H., Guan T. S., Chan Hong E. (et al.). Effect of different LED lights spectrum on the *in vitro* germination of gacseed (*Momordica cochinchinensis*). Aust. J. Crop Sci. 2020; 14(11): 1715-1722. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.11.p1693>.

35. Macedo A. F., Leal-Costa M. V., Tavares E. S., Lage C. L. S., Esquibel M. A. The effect of light quality on leaf production and development of *in vitro*-cultured plants of *Alternanthera brasiliensis* Kuntze. Environ. Exp. Bot. 2011; 70(1): 43-50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.05.012>.

36. Poncetta P., Ioratti D., Mignani I., Giongo L. *In vitro* propagation of red raspberry under light-emitting diodes (LEDs). Acta Horticulturae. 2015; 1155: 369-374. DOI: <https://doi.org/10.17660/actahortic.2017.1155.54>.

37. Silvestri C., Caceres M. E., Ceccarelli M., Pica A. L., Rugini E., Cristofori V. Influence of Continuous Spectrum Light on Morphological Traits and Leaf Anatomy of Hazelnut Plantlets. Front. Recent Dev. Plant Sci. 2019; 10: 1-12. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01318>.

38. Lotfi M., Mars M., Werbrouck S. Optimizing pear micropropagation and rooting with light emitting diodes and trans-cinnamic acid. Plant Growth Regul. 2019; 88(2): 173-180. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10725-019-00498-y>.

39. Амброс Е. В., Толузакова С. Ю., Новикова Т. И. Влияние светодиодного и люминесцентного освещений на развитие растений-регенерантов *Fragaria* × *ananassa* Duch. на этапе укоренения *in vitro*. Плодоводство и ягодоводство России. 2017; 48(2): 18-24. URL: <https://www.plodovodstvo.com/jour/article/view/70>.

40. Roni M. Z. K., Islam M. S., Shimasaki K. Response of Eustoma leaf phenotype and photosynthetic performance to LED light quality. Acta Hort. 2017; 3(4): 1-16. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae3>.

41. Chen L. L., Zhang K., Gong X. C. (et al.). Effects of different LEDs light spectrum on the growth, leaf anatomy, and chloroplast ultrastructure of potato plantlets *in vitro* and minituber production after transplanting in the green house. J. Integr. Agric. 2020; 19(1): 108-119. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62633-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62633-X).

42. Pillitteri L. J., Torii K. U. Mechanisms of stomatal development. Annu. Rev. Plant Biol. 2012; 63: 591-614. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105451>.

43. Kim S. J., Hahn E. J., Heo J. W., Paek, K. Y. Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets *in vitro*. Sci. Hortic. 2004; 101(1-2): 143-151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2003.10.003>.

### References

1. Dutta Gupta S. Light emitting diodes for agriculture. Singapore Springer Nature Singapore Pte Ltd, Singapore. 2017: 334. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-10-5807-3>.

2. Landi M., Zivcak M., Sytar O., Brestic M., Allakhverdiev S. I. Plasticity of photosynthetic processes and the accumulation of secondary metabolites in plants in response to monochromatic light environments: A review. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*. 2020; 1861: 148131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2019.148131>.
3. Batista D. S., Felipe S. H. S., Silva T. D. (et al.). Light quality in plant tissue culture: does it matter? *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*. 2018; 54(3): 195-215. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11627-018-9902-5>.
4. Voitsekhovskaja O. V. Phytochromes and other (photo) receptors of information in plants. *Russ. J. Plant Physiol*. 2019; 66(3): 351-364. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1021443719030154>.
5. Zakurin A. O., Shchennikova A. V., Kamionskaya A. M. Artificial-Light Culture in Protected Ground Plant Growing: Photosynthesis, Photomorphogenesis, and Prospects of LED Application. *Russ. J. Plant Physiol*. 2020; 67: 413-424. DOI: <https://doi.org/10.1134/s102144372003022x>.
6. Kudelina T. N., Konstantinov A. V., Obuhovskaya L. V., Molchan O. V. Osobennosti formirovaniya fotosinteticheskogo apparata mikroklonov *Populus tremula* L. i *Betula pendula* Roth. pri LED-osveshchenii razlichnogo spektral'nogo sostava v processe adaptacii *ex vitro*. *Izvestiya Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Seriya biologicheskikh nauk*. 2019;64(4):456-466. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2019-64-4-456-466>.
7. Yudina L., Sukhova E., Mudrilov M. (et al.). Ratio of Intensities of Blue and Red Light at Cultivation Influences Photosynthetic Light Reactions, Respiration, Growth, and Reflectance Indices in Lettuce. *Biology*. 2022; 11(1): 60. DOI: <https://doi.org/10.3390/biology11010060>.
8. Xiaoying L., Mingjuan Y., Xiaodong X. (et al.) Effect of light on growth and chlorophyll development in kiwifruit *ex vitro* and *in vitro*. *Scientia Horticulturae*. 2022; 291: 110599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110599>.
9. Chung G. J., Lee J. H., Oh M. M. Growth and Acclimation of *In Vitro*-Propagated M9 Apple Rootstock Plantlets under Various Visible Light Spectrums. *Agronomy*. 2020; 10(7): 1017. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10071017>.
10. Tao R., Bai S., Ni J., Yang Q., Zhao Y., Teng Y. The blue light signal transduction pathway is involved in anthocyanin accumulation in 'Red Zaosu' pear. *Planta*. 2018; 248(1): 37-48. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00425-018-2877-y>.
11. Dănilă-Guidea S. M., Delian E. An overview on blue light benefits on plants physiological performances and on plant products qualities. *Scientific Papers. Series B, Horticulture*. 2020; LXIV(1): 643-652. URL: [http://horticulturejournal.usamv.ro/pdf/2020/issue\\_1/Art94.pdf](http://horticulturejournal.usamv.ro/pdf/2020/issue_1/Art94.pdf).
12. Brelford C. C., Robson T. M. Blue light advances bud burst in branches of three deciduous tree species under short-day conditions. *Trees*. 2018; 32(4): 1157. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1684-1>.
13. Matthews J. S., Violet-Chabrand S., Lawson T. Role of blue and red light in stomatal dynamic behaviour. *Journal of Experimental Botany*. 2020; 71(7): 2253-2269. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erz563>.
14. Rahmati Ishka M. A surprising feature of the blue light: Regulation of leaf hydraulic conductance via an autonomous phototropin-mediated blue light signaling pathway in bundle-sheath cells. *The Plant Cell*. 2022; 231: 2231-2246. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.17538>.
15. Ni J., Dong L., Jiang Z. (et al.). Salicylic acid-induced flavonoid accumulation in *Ginkgo biloba* leaves is dependent on red and far-red light. *Industrial Crops and Products*. 2018;118:102-110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.03.044>.
16. Novikov A. I. Sovershenstvovanie tekhnologii polucheniya vysokokachestvennogo lesosemennogo materiala (Improvement of technology for obtaining high-quality forest seed material). *Dokt. dis. Voronezh*. 2021. (In Russ.).
17. Fernandes P., Tedesco S., Vieira da Silva I., Santos C., Machado H., Lourenço Costa R. A new clonal propagation protocol develops quality root systems in chestnut. *Forests*. 2020; 11(8): 826. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11080826>.

18. Henao-Ramírez A. M., Urrea-Trujillo A. I. Somatic Embryogenesis for Clonal Propagation and Associated Molecular Studies in Cacao (*Theobroma cacao* L.). In Agricultural, Forestry and Bioindustry Biotechnology and Biodiscovery / Chong, P., Newman, D., Steinmacher, D. (eds). Springer, Cham. 2020: 63-102. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-51358-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51358-0_5).
19. Zeps M., Kondratovičs T., Grigžde E., Jansons Ā., Zeltiņš P., Samsone I., Matisons R. Plantlet Anatomy of Silver Birch (*Betula pendula* Roth.) and Hybrid Aspen (*Populus tremuloides* Michx.× *Populus tremula* L.) Shows Intraspecific Reactions to Illumination *In Vitro*. *Plants*. 2022;11(8):1097 DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11081097>.
20. Gailis A., Samsone I., Šēnhofa S., Girgžde E., Kāpostiņš R., Jansons Ā. Silver birch (*Betula pendula* Roth.) culture initiation *in vitro* and genotype determined differences in micropropagation. *New Forests*. 2021; 52(5): 791-806. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09828-9>.
21. Kabyzbekova B., Turdiev T., Chukanova N., Kovalchuk I. Optimization of *in vitro* cloning of different genotypes of fruit and berry crops. *Journal of Biotechnology*. 2019; 305: S59. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2019.05.208.
22. Khlebova L. P., Titova A. M., Pirogova A. V. Biotechnological approaches to the reproduction of remontant forms of red raspberry. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2019; 9(3): 402-405. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/biotechnological-approaches-to-the-reproduction-of-remontant-forms-of-red-raspberry>.
23. Oseni O. M., Pande V., Nailwal T. K. A review on plant tissue culture, a technique for propagation and conservation of endangered plant species. *International journal of current microbiology and applied sciences*. 2018; 7(7): 3778-3786. DOI: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.707.438>.
24. Aneli N. A. Atlas epidermy lista. Tbilisi: Mecnierba. 1975: 105 p. (In Russ.).
25. Su J., Liu B., Liao J., Yang, Z., Lin C., Oka Y. Coordination of cryptochrome and phytochrome signals in the regulation of plant light responses. *Agron. J*. 2017; 7(1): 1-22. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy7010025>.
26. Nacheva L., Dimitrova N., Koleva-Valkova L., Tarakanov I., Vassilev A. Effect of LED light on the growth of raspberry (*Rubus idaeus* L.) plants *in vitro*. *Agric. Sci*. 2021; 13(29): 126-140. DOI: <https://doi.org/10.22620/agricsci.2021.29.015>.
27. Kudelina T. N., Krivobok A. S., Bibikova T. N., Molchan O. V. Features of *Arabidopsis thaliana* photomorphogenesis when using LED-lighting with different spectral composition. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Biological Series*. 2021; 66(1): 42-52. DOI: <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2021-66-1-42-52>
28. Kudelina T. N., Krivobok A. S., Bibikova T. N., Molchan O. V. Features of *Arabidopsis thaliana* photomorphogenesis when using LED-lighting with different spectral composition. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Biological Series*. 2021; 66(1): 42-52. DOI: <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2021-66-1-42-52>.
29. Yakovceva M. N., Govorova G. F., Tarakanov I. G. Fotomorfogeneticheskaya regulyaciya rosta, razvitiya i produkcionnogo processa rastenij zemlyaniki sadovoj (*Fragaria*×*ananassa* L.) v usloviyah svetokul'tury. *Izvestiya Timiryazevskoj sel'skohozyajstvennoj akademii*. 2015; 3: 25-35. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fotomorfogeneticheskaya-regulyatsiya-rosta-razvitiya-i-produkcionnogo-protsessa-rastenij-zemlyaniki-sadovoy-fragaria-h-ananassa-l-v>.
30. Li Y., Xin G., Liu C., Shi Q., Yang F., Wei M. Effects of red and blue light on leaf anatomy, CO<sub>2</sub> assimilation and the photosynthetic electron transport capacity of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings. *BMC Plant Biol*. 2020;20(1):1-16. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.2.24179/v3>.
31. Obuhovskaya L.V., Kudelina T.N., Konstantinov A.V. Adaptaciya ex vitro mikroklonal'no razmnozhenykh rastenij karel'skoj berezy (*Betula pendula* var. *carelica* Mercl.) v usloviyah polnospektral'nogo LED-osveshcheniya pri var'irovanii fiziologicheskimi vazhnykh spektral'nykh diapazonov. *Kletochnaya biologiya i biotekhnologiya rastenij: tez. dokl. III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Resp. Belarus', Minsk, 24–27 maya 2022 g. Belarus. gos. un-t, In-t lesa NAN Belarusi; redkol.: V. V. Demidchik (gl. red) [i dr.]*. Minsk : BGU. 2022:72. (In Russ.). URL: <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/281098/1/72.pdf>.
32. Cel'niker Yu. L. Fiziologicheskie osnovy tenevynoslivosti drevesnykh rastenij. M., 1978. 212 p. (In Russ.).
33. Cioć M., Szewczyk A., Żupnik M., Kalisz A., Pawłowska B. LED lighting affects plant growth, morphogenesis and phytochemical contents of *Myrtus communis* L. *in vitro*. *Plant Cell, Tissue Organ Cult*. 2018; 132 (3): 433-447. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11240-017-1340-2>.

34. Lim C. H., Guan T. S., Chan Hong E. (et al.). Effect of different LED lights spectrum on the *in vitro* germination of gacseed (*Momordica cochinchinensis*). Aust. J. Crop Sci. 2020; 14(11): 1715-1722. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.11.p1693>.
35. Macedo A. F., Leal-Costa M. V., Tavares E. S., Lage C. L. S., Esquibel M. A. The effect of light quality on leaf production and development of *in vitro*-cultured plants of *Alternanthera brasiliana* Kuntze. Environ. Exp. Bot. 2011; 70(1): 43-50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.05.012>.
36. Poncetta P., Ioratti D., Mignani I., Giongo L. *In vitro* propagation of red raspberry under light-emitting diodes (LEDs). Acta Horticulturae. 2015; 1155: 369-374. DOI: <https://doi.org/10.17660/actahortic.2017.1155.54>.
37. Silvestri C., Caceres M. E., Ceccarelli M., Pica A. L., Rugini E., Cristofori V. Influence of Continuous Spectrum Light on Morphological Traits and Leaf Anatomy of Hazelnut Plantlets. Front. Recent Dev. Plant Sci. 2019; 10: 1-12. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01318>.
38. Lotfi M., Mars M., Werbrouck S. Optimizing pear micropropagation and rooting with light emitting diodes and trans-cinnamic acid. Plant Growth Regul. 2019; 88(2): 173-180. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10725-019-00498-y>.
39. Ambros E. V., Toluzakova S. Yu., Novikova T. I. The effect of light-emitting diodes and fluorescent light on development of *Fragaria×ananassa* Duch. regenerants during *in vitro* rooting stage. Pomiculture and small fruits culture in Russia. 2017; 48(2): 18-24. (In Russ.). URL: <https://www.plodovodstvo.com/jour/article/view/70>.
40. Roni M. Z. K., Islam M. S., Shimasaki K. Response of Eustoma leaf phenotype and photosynthetic performance to LED light quality. Acta Hortic. 2017; 3(4): 1-16. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae3>.
41. Chen L. L., Zhang K., Gong X. C. (et al.). Effects of different LEDs light spectrum on the growth, leaf anatomy, and chloroplast ultrastructure of potato plantlets *in vitro* and minituber production after transplanting in the green house. J. Integr. Agric. 2020; 19(1): 108-119. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62633-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62633-X).
42. Pillitteri L. J., Torii K. U. Mechanisms of stomatal development. Annu. Rev. Plant Biol. 2012; 63: 591-614. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105451>.
43. Kim S. J., Hahn E. J., Heo J. W., Paek, K. Y. Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets *in vitro*. Sci. Hortic. 2004; 101(1-2): 143-151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2003.10.003>.

### Сведения об авторах

*Евлаков Петр Михайлович* – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией анализа ПЦР, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0138-2410>, e-mail: [peter.evlaikov@yandex.ru](mailto:peter.evlaikov@yandex.ru).

✉ *Гродецкая Татьяна Александровна* – научный сотрудник лаборатории анализа ПЦР, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5448-2792>, e-mail: [tatyana.pokusina@yandex.ru](mailto:tatyana.pokusina@yandex.ru).

*Федорова Ольга Анатольевна* – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории анализа ПЦР, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7581-6141>, e-mail: [fed-olga78@mail.ru](mailto:fed-olga78@mail.ru).

*Шестаков Роман Анатольевич* – младший научный сотрудник лаборатории анализа ПЦР, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7403-7971>, e-mail: [sofer82@mail.ru](mailto:sofer82@mail.ru).

*Баранов Олег Юрьевич* – доктор биологических наук, доцент, академик-секретарь Отделения биологических наук НАН Беларуси, чл.-корр. НАН Беларуси, ул. Пролетарская, 71, г. Гомель, 246001, Республика Беларусь, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0665-0093>, e-mail: [betula-belarus@mail.ru](mailto:betula-belarus@mail.ru).



### Information about the authors

*Peter M. Evlakov* – Cand. Biol., Head of the Laboratory of Forest Taxation, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0138-2410>, e-mail: [peter.evlakov@yandex.ru](mailto:peter.evlakov@yandex.ru).

✉ *Tatiana A. Grodetskaya* – Researcher of the Laboratory of Biotechnologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5448-2792>, e-mail: [tatyana.pokusina@yandex.ru](mailto:tatyana.pokusina@yandex.ru).

*Olga A. Fedorova* – Cand. Biol., Researcher of the Laboratory of Biotechnologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7581-6141>, e-mail: [fed-olga78@mail.ru](mailto:fed-olga78@mail.ru).

*Roman A. Shestakov* – Junior Researcher of the Laboratory of Biotechnologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7403-7971>, e-mail: [sofer82@mail.ru](mailto:sofer82@mail.ru).

*Oleg Yu. Baranov* – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Academician-Secretary of the Department of Biological Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Proletarskaya str., 71, Gomel, 246050, Belarus, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0665-0093>, e-mail: [betula-belarus@mail.ru](mailto:betula-belarus@mail.ru).

✉ – Для контактов/Corresponding author